



Julio-Septiembre 2026
Vol. 4, núm. 3 / pp. 209-214

Recibido: 08 de Enero de 2026
Aceptado: 24 de Febrero de 2026

doi: 10.35366/122790



Desarrollo de un método semiautomático asistido por IA para la medición de unidades Hounsfield en columna lumbar. Estudio preliminar

Development of an AI-assisted semi-automated method for Hounsfield unit measurement in the lumbar spine. Preliminary study

Alin Ludmila Garay,^{*,‡} Pedro Luis Bazán,^{*,§} Micaela Cinalli,^{*,¶} Arles Pérez Gutiérrez^{*,||}

Palabras clave:
osteoporosis, salud ósea,
DXA, unidades Hounsfield,
inteligencia artificial.

Keywords:
osteoporosis, healthy
bone, DXA, Hounsfield
unit, artificial intelligence.

RESUMEN

Introducción: la osteoporosis es un problema sanitario global y el acceso limitado a densitometría de rayos X de doble energía (DXA) dificulta su diagnóstico oportuno. La medición de unidades Hounsfield (UH) en tomografía computarizada (TC) ha surgido como una herramienta complementaria para estimar la calidad ósea, especialmente en contextos donde la DXA no está disponible. El uso de inteligencia artificial (IA) en imágenes médicas ha crecido de manera exponencial, sin embargo, una de las limitaciones de los modelos automáticos es la dificultad de implementación y escasa validación externa. En este escenario, los métodos semiautomáticos asistidos por IA podrían representar una alternativa viable, aunque la evidencia sigue siendo limitada. El objetivo de este estudio fue desarrollar un método semiautomático asistido por IA para medir unidades Hounsfield en vértebras lumbares y evaluar su factibilidad y concordancia con la medición manual. **Material y métodos:** el sistema fue implementado en Python e incluyó un módulo de preprocesamiento y otro de análisis automatizado que generó un ROI elíptico ajustado de forma estandarizada a ≤ 2 mm de la cortical. **Resultados:** tras una prueba piloto que permitió corregir errores de delimitación, se procesaron 36 vértebras (L1-L4). El método evidenció alta correlación con el análisis manual ($r = 0.956$), excelente concordancia ($ICC = 0.943$) y un sesgo reducido (+6.8 UH), sin tendencia proporcional según Bland-Altman. **Conclusiones:** el método semiautomático obtuvo resultados equivalentes a los del análisis manual, con concordancia elevada y diferencias de magnitud mínima. Estos hallazgos respaldan su continuidad en estudios con mayor tamaño muestral.

ABSTRACT

Introduction: osteoporosis is a global health issue, and limited access to dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) hinders its timely diagnosis. The measurement of Hounsfield units (HU) in computed tomography (CT) has emerged as a complementary tool for estimating bone quality, particularly in settings where DXA is unavailable. Concurrently, the use of artificial intelligence (AI) in medical imaging has grown exponentially; however, automated models are often limited by implementation

* Hospital Interzonal General de Agudos (HIGA), San Martín de La Plata. La Plata, Buenos Aires.

‡ AOSpine Fellow.

ORCID: 0009-0003-7304-6843

§ Hospital Italiano de La Plata.

Instituto de Diagnóstico La Plata.

ORCID: 0000-0003-0060-6558

¶ ORCID: 0000-0003-2057-4469

|| AOSpine Fellow.

ORCID: 0009-0006-8234-1600

Correspondencia:

Pedro Luis Bazán

E-mail: pedroluisbazan@gmail.com

Citar como: Garay AL, Bazán PL, Cinalli M, Pérez GA. Desarrollo de un método semiautomático asistido por IA para la medición de unidades Hounsfield en columna lumbar. Estudio preliminar. Cir Columna. 2026; 4 (3): 209-214. <https://dx.doi.org/10.35366/122790>



*difficulties and scarce external validation. In this scenario, AI-assisted semi-automated methods could represent a viable alternative, although evidence remains limited. The objective of this study was to develop an AI-assisted semi-automated method to measure Hounsfield units in lumbar vertebrae and to assess its feasibility and agreement with manual measurement. **Material and methods:** the system was implemented in Python and included a preprocessing module and an automated analysis module that generated an elliptical region of interest (ROI), adjusted in a standardized manner to ≤ 2 mm from the cortical bone. **Results:** following a pilot test that allowed for the correction of segmentation errors, 36 vertebrae (L1-L4) were processed. The method demonstrated high correlation with manual analysis ($r = 0.956$), excellent agreement (ICC = 0.943), and reduced bias (+6.8 HU), with no proportional bias observed according to the Bland-Altman analysis. **Conclusions:** the semi-automated method yielded results equivalent to those of manual analysis, showing high agreement and minimal differences. These findings support its further investigation in studies with larger sample sizes.*

Abreviaturas:

DE = desviación estándar
DXA = absorciometría de rayos X de doble energía
IA = inteligencia artificial
ICC = coeficiente de correlación intraclase
ROI = región de interés
SSAIA = método semiautomático asistido por IA
TC = tomografía computarizada
UH = unidades Hounsfield

INTRODUCCIÓN

La osteoporosis es una problemática mundial asociada a altas tasas de morbilidad, mortalidad y costos económicos significativos.

Actualmente, el estándar de oro para el diagnóstico de esta patología es la absorciometría de rayos X de doble energía (DXA). Sin embargo, varios estudios mencionan la alta variabilidad tanto en el acceso como en la calidad de los servicios de DXA a nivel mundial.^{1,2} Estas desigualdades retrasan el diagnóstico oportuno y dificultan la implementación de estrategias de prevención y tratamiento en poblaciones vulnerables.

Si bien el DXA es el método utilizado universalmente, en los últimos años se han incorporado otras técnicas de imagen, como es el caso de la tomografía computarizada (TC), que permite caracterizar distintos aspectos de la calidad ósea y, en algunos casos, estimar el riesgo de complicaciones relacionadas con la osteoporosis de manera complementaria.³⁻⁵

La implementación de la inteligencia artificial (IA) en el análisis de imágenes médicas ha crecido de manera exponencial, y el campo de la osteoporosis no es la excepción. Revisiones sistemáticas recientes muestran que los modelos basados en aprendizaje profundo o *machine learning* pueden clasificar correctamente la osteoporosis a partir de radiografías y TC, con sensibilidades y especificidades superiores al 80-90%.^{6,7} Estudios multicéntricos demostraron que los valores de densidad ósea

pueden predecirse directamente desde tomografías rutinarias.⁸ Sin embargo, la mayoría de los algoritmos han sido desarrollados en entornos altamente controlados, con escasa validación externa, variabilidad en protocolos de imagen y una limitada implementación clínica.⁹

En centros públicos o de baja disponibilidad tecnológica, los modelos automáticos de IA suelen ser difíciles de implementar debido a los requerimientos elevados de *hardware*, licenciamiento y compatibilidad entre sistemas, además de su limitada interpretabilidad. En este contexto, existe la necesidad de desarrollar métodos semiautomáticos asistidos por IA (SSAIA) que combinen el control humano con la automatización, y que sean reproducibles, de bajo costo e integrables en la práctica clínica. La literatura ofrece escasa evidencia sobre el desempeño real de métodos semiautomáticos aplicados específicamente a la medición de unidades Hounsfield (UH) en vértebras lumbares y sobre su reproducibilidad frente al método manual en condiciones clínicas habituales.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un método semiautomático asistido por IA para la medición de unidades Hounsfield en vértebras lumbares, analizando su factibilidad de uso y comparándolo con el método de medición manual.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño

Se realizó un estudio observacional, donde se desarrolló un sistema semiautomático asistido por IA para realizar las mediciones de UH en vértebras lumbares.

Se realizó una prueba piloto para evaluar su factibilidad de uso y posibles errores; posteriormente, se evaluó la concordancia con mediciones realizadas de forma manual.

Desarrollo del sistema

El método desarrollado se define como semiautomático, ya que combina una intervención inicial del operador con un procesamiento automatizado asistido por inteligencia artificial.

Se empleó un método semiautomático desarrollado en lenguaje Python (versión 3.10) e implementado en Google Colab, un entorno de ejecución basado en la nube.

Durante su desarrollo, se utilizó ChatGPT (OpenAI) como apoyo en la redacción y depuración de código en Python. Las funciones generadas fueron revisadas y modificadas por el investigador hasta alcanzar la versión final del programa.

El programa se estructuró en dos módulos funcionales: 1) celda A (preprocesamiento): permite cargar estudios en formato ZIP DICOM o NIFTI, convertirlos y remuestrearlos, generando vistas axiales y coronales interactivas. El operador selecciona la vértebra de interés y marca un punto dentro del hueso trabecular; 2) celda B (medición automatizada): a partir del punto elegido, el programa identifica de forma estandarizada el contorno trabecular y delimita una región de interés (ROI) elíptica, cuyo borde externo se mantiene a no

más de 2 mm de la cortical, abarcando el mayor área vertebral permitida. El programa obtiene de forma automática el promedio de unidades Hounsfield (UH) y la desviación estándar (DE) dentro del área seleccionada (*Figura 1*).

Durante el desarrollo se utilizaron *prompts* de depuración e interacción que permiten al operador visualizar la posición de la ROI y confirmar la selección antes del cálculo final.

Prueba piloto

El objetivo de la prueba piloto fue utilizar el SSAIA para estandarizar la delimitación de la ROI en las mediciones de UH de vértebras lumbares, evaluando posibles errores del sistema y realizando las correcciones correspondientes.

Se seleccionaron imágenes de tomografías de forma no aleatoria, sin seguir un patrón de selección; se recopilaron las que se encontraban disponibles en el sistema de archivo de imágenes de la institución, realizadas previamente por otras indicaciones médicas y en las cuales se podía visualizar la columna lumbar en su totalidad. Se tomó precaución de no cargar imágenes con datos personales de los pacientes.

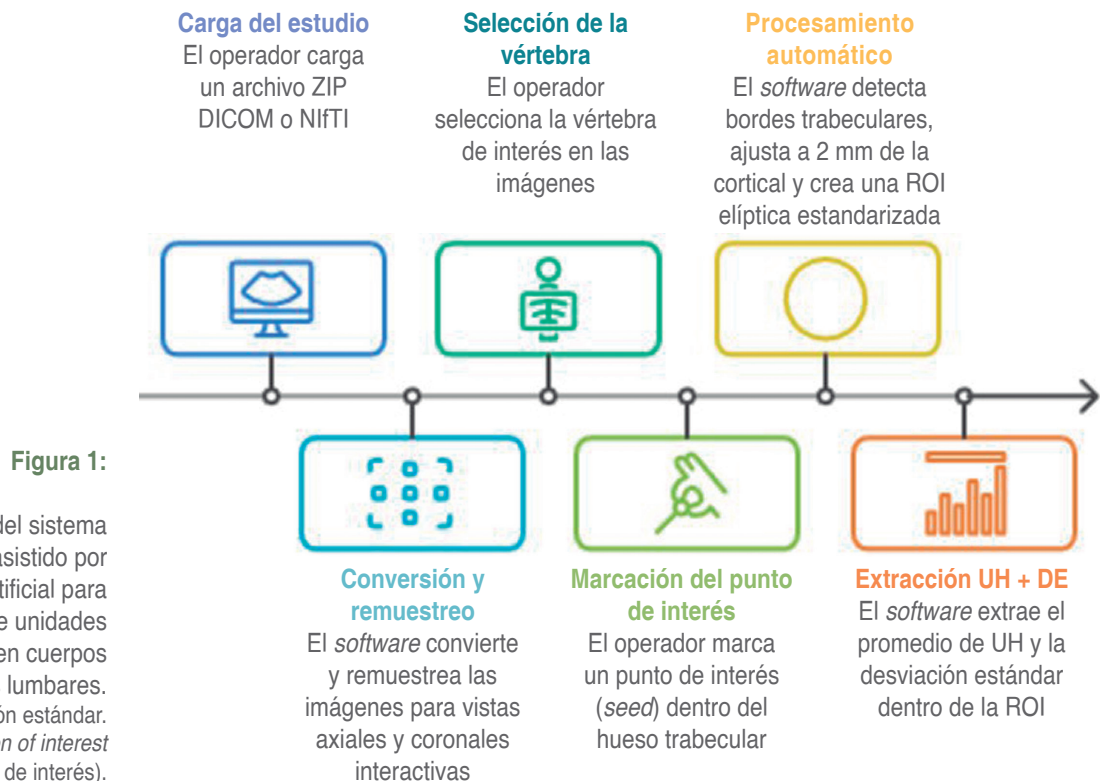


Figura 1:

Flujo de trabajo del sistema semiautomático asistido por inteligencia artificial para la medición de unidades Hounsfield (UH) en cuerpos vertebrales lumbares. DE = desviación estándar. ROI = *region of interest* (región de interés).

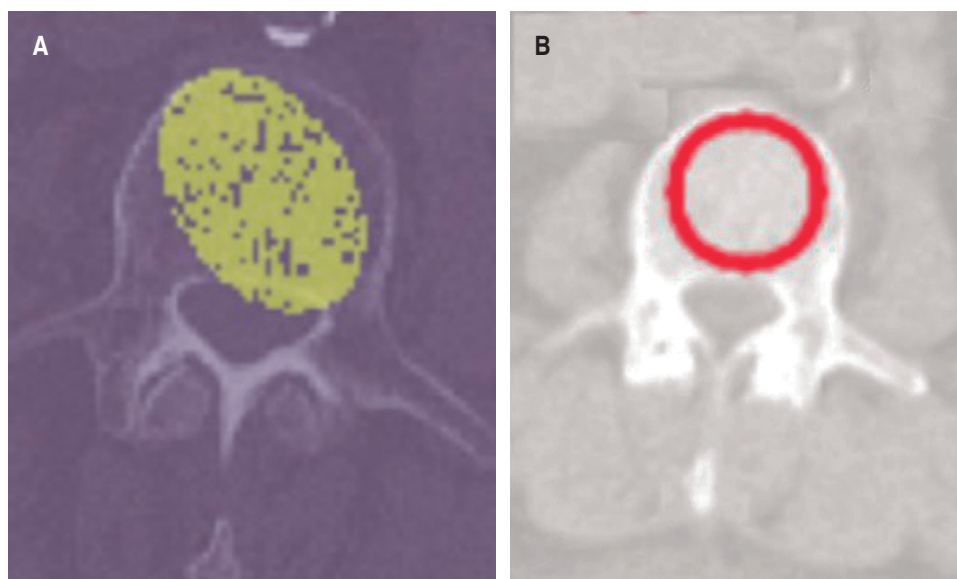


Figura 2:

Comparación entre la versión inicial **(A)** y la versión ajustada **(B)** del método semiautomático para la delimitación de la región de interés (ROI) en el cuerpo vertebral. **A)** El área de medición incluye parcialmente la cortical ósea (amarillo). **B)** El algoritmo restringe el borde externo de la ROI a no más de 2 mm de la cortical (rojo).

Se compararon los valores de UH con los valores obtenidos por medición manual del experto y se ajustó el sistema ante eventuales fallas.

Comparación con el sistema manual de medición

Una vez ajustado el sistema, se procede a realizar la comparación con una muestra mayor. Para la recolección de imágenes tomográficas, se eligieron nueve pacientes del sistema de imágenes de la institución (tomografías ya realizadas por diversas indicaciones médicas) que debían contar con imágenes de la región lumbar en su totalidad. Se realizaron las mediciones en las vértebras de L1 a L4, excluyendo aquellas fracturadas, con instrumentación previa o enfermedad ósea local (metástasis o hemangiomas). Los estudios se analizaron en formato DICOM; en ninguna imagen cargada se expusieron los datos personales de los pacientes.

Las mediciones manuales fueron realizadas por un cirujano de columna experimentado, utilizando cortes axiales entre los niveles L1 y L4. En cada vértebra se delimitó una ROI circular, ubicada en el centro del cuerpo vertebral, evitando la inclusión de hueso cortical. Para cada ROI se registró el valor promedio de UH.

Se determinó la media, el DE, el intervalo de confianza del 95% (IC95%) y el valor de p, con el objetivo de identificar posibles diferencias sistemáticas entre ambos métodos.

La normalidad de los datos se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk, y la correlación de Pearson permitió analizar la relación lineal entre ambos métodos.

Para evaluar el grado de concordancia entre los métodos, se calculó el coeficiente de correlación intraclass (ICC). Los valores de ICC se interpretaron según la escala habitual:

- a) < 0.5 = concordancia pobre
- b) $0.5-0.75$ = moderada
- c) $0.75-0.9$ = buena
- d) 0.9 = excelente concordancia

Se elaboró un gráfico de Bland–Altman, con el fin de estimar el sesgo promedio entre los dos métodos y los límites de concordancia ($\text{media} \pm 1.96 \text{ DE}$), determinando la magnitud y dirección de las diferencias individuales entre las mediciones manuales y semiautomáticas.

El nivel de significación estadística se estableció en $p < 0.05$, empleando una prueba t para muestras pareadas para comparar ambos métodos.

RESULTADOS

Aplicación del sistema y prueba piloto

En la prueba piloto del sistema desarrollado, se observó que había grandes diferencias entre las mediciones del SSAIA y las manuales. Al analizar las posibles fallas, se observó que en algunas mediciones el ROI incluía parcialmente el hueso cortical, lo que aumentaba el valor de UH. Se ajustó el algoritmo limitando el borde externo a 2 mm de la cortical

(Figura 2). Se midieron nuevamente las mismas imágenes y la diferencia media entre ambos métodos disminuyó de 23.7 a 6.8 UH, con una reducción significativa del sesgo.

Comparación con sistema de medición manual

Una vez ajustado el sistema, se analizaron un total de 36 vértebras lumbares (L1 a L4) correspondientes a nueve pacientes adultos. Todas las tomografías fueron procesadas correctamente en formato DICOM, sin incidencias técnicas.

En la primera versión del modelo semiautomático, comparado con la medición manual, se registraron valores de media de densidad ósea, para el método manual, de 183.32 ± 58.27 UH, mientras que el semiautomático inicial arrojó un promedio de 202.18 ± 54.65 UH. La diferencia media entre ambos métodos fue de 23.7 UH, con un intervalo de confianza del 95% (10.9 a 36.5 UH) y una significancia estadística de $p = 0.0006$.

Luego de realizar la corrección del algoritmo para la delimitación precisa del ROI y la exclusión de hueso cortical, se repitieron las mediciones en las mismas vértebras.

La segunda versión del prototipo mostró valores medios de 185.08 ± 59.98 UH para el modelo semiautomático, mientras que las mediciones manuales se mantuvieron en 183.32 ± 58.27 UH.

El análisis de correlación evidenció una asociación significativa entre ambos métodos ($r = 0.956$; $p < 0.05$).

El ICC fue de 0.943 (IC95% = 0.89-0.97), lo que indica una concordancia excelente entre las mediciones manuales y semiautomáticas.

El gráfico de Bland-Altman mostró un sesgo promedio de +6.8 UH, con límites de concordancia entre -28.0 UH y +41.6 UH, sin tendencia a sobrestimar o subestimar los valores respecto al método manual (Figura 3).

DISCUSIÓN

En este estudio se compararon las mediciones de densidad ósea vertebral (UH) obtenidas de forma manual y mediante un método semiautomático desarrollado por el investigador.

Los resultados mostraron una alta correlación y excelente concordancia entre ambos procedimientos ($r = 0.956$; ICC = 0.943), lo que indica que el método semiautomático logra resultados muy próximos a los del análisis manual.

En la primera etapa del desarrollo, el método semiautomático presentó valores más elevados que los manuales, lo que se interpretó por la inclusión parcial de hueso cortical dentro del ROI. Luego del ajuste del algoritmo, limitando el borde externo a 2 mm de la cortical, la diferencia media entre ambos métodos disminuyó de 23.7 a 6.8 UH, con una reducción significativa del sesgo. Esto demuestra que la corrección del modelo permitió obtener una medición más precisa y anatómicamente representativa del hueso trabecular.

El alto nivel de correlación observado sugiere que la automatización parcial del proceso no compromete la medición. La inclusión del control del operador previo a cada cálculo permite evitar errores de inclusión de estructuras no deseadas, manteniendo la fiabilidad de los resultados y facilitando su adaptación a la práctica hospitalaria.

En el marco de los métodos de medición de UH previamente descritos en la literatura,³⁻⁵ los resultados del presente estudio muestran que un método semiautomático, que combina la intervención del operador con un proceso automatizado asistido por inteligencia artificial, puede alcanzar una concordancia comparable con la medición manual.

Entre las fortalezas del estudio destaca la validación directa del método sobre datos clínicos reales y la implementación en un entorno de libre acceso (Google Colab, Python), lo que favorece su replicabilidad. La principal limitación fue el tamaño de la muestra reducido, propio de una prueba piloto.

Estos hallazgos preliminares respaldan la viabilidad del enfoque semiautomático asistido por IA y justifican

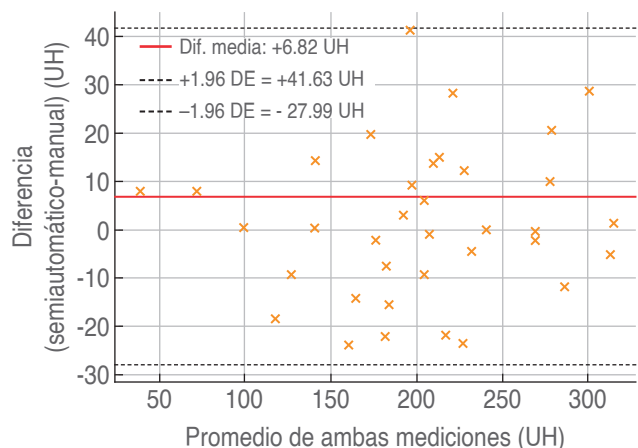


Figura 3: Gráfico de Bland-Altman. Medición manual vs. semiautomática.
UH = unidades Hounsfield.

avanzar hacia evaluaciones con mayor tamaño muestral y en escenarios clínicos variados.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un método semiautomático asistido por inteligencia artificial para la medición de unidades Hounsfield en columna vertebral, que mostró un desempeño equivalente a la medición manual, con alta concordancia y diferencias mínimas. Al tratarse de un estudio preliminar, la muestra fue pequeña; estudios futuros con un mayor número de pacientes permitirán confirmar estos hallazgos y confirmar su aplicación en la práctica diaria.

REFERENCIAS

1. Maeda SS, LLibre RDS, Arantes HP, de Souza GC, Molina FFC, Wiluzanski D, et al. Challenges and opportunities for quality densitometry in Latin America. *Arch Osteoporos*. 2021; 16: 23. doi: 10.1007/s11657-021-00892-y.
2. Clynes MA, Westbury LD, Dennison EM, Kanis JA, Javaid MK, Harvey NC, et al. Bone densitometry worldwide: a global survey by the ISCD and IOF. *Osteoporos Int*. 2020; 31: 1779-1786. doi: 10.1007/s00198-020-05435-8.
3. Bazán PL, Jordan RC, Cevallos JRM, Adaro AOG, Adaro JCS. Hounsfield units use in spinal surgery planning: Systematic review and meta-analysis. *Coluna/Columna*. 2022; 21: e264579. Available in: <https://doi.org/10.1590/s1808-185120222103264579>
4. St Jeor JD, Jackson TJ, Xiong AE, Freedman BA, Sebastian AS, Currier BL, et al. Average lumbar Hounsfield units predicts osteoporosis-related complications following lumbar spine fusion. *Global Spine J*. 2022; 12: 851-857. doi: 10.1177/2192568220975365.
5. Ahern DP, McDonnell JM, Riffault M, Evans S, Wagner SC, Vaccaro AR, et al. A meta-analysis of the diagnostic accuracy of Hounsfield units on computed topography relative to dual-energy X-ray absorptiometry for the diagnosis of osteoporosis in the spine surgery population. *Spine J*. 2021; 21: 1738-1749. doi: 10.1016/j.spinee.2021.03.008.
6. Liu RW, Ong W, Makmur A, Kumar N, Low XZ, Shuliang G, et al. Application of artificial intelligence methods on osteoporosis classification with radiographs-a systematic review. *Bioengineering (Basel)*. 2024; 11: 484. doi: 10.3390/bioengineering11050484.
7. Ong W, Liu RW, Makmur A, Low XZ, Sng WJ, Tan JH, et al. Artificial intelligence applications for osteoporosis classification using computed tomography. *Bioengineering (Basel)*. 2023; 10: 1364. doi: 10.3390/bioengineering10121364.
8. Park H, Kang WY, Woo OH, Lee J, Yang Z, Oh S. Automated deep learning-based bone mineral density assessment for opportunistic osteoporosis screening using various CT protocols with multi-vendor scanners. *Sci Rep*. 2024; 14: 25014. doi: 10.1038/s41598-024-73709-w.
9. Deng Y, Chen X, Yao N, Geng C, Yuan C, Chen Q, et al. Two-decade dialogue between artificial intelligence and osteoporosis: research trajectories and frontier projections under bibliometric and visual analysis. *Front Med (Lausanne)*. 2025; 12: 1606361. doi: 10.3389/fmed.2025.1606361.

Conflicto de intereses: los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses en esta presentación.